专题：服务碳中和目标的海洋负排放技术路径与战略思考
Technical Roadmap and Strategic Thinking of Ocean Negative Emissions Aiming Carbon Neutrality

海水养殖践行“海洋负排放”的途径

张继红[1]　刘纪化[2]　张永雨[3]　李　刚[4]

1 中国水产科学研究院黄海水产研究所　青岛　266071
2 山东大学　海洋研究院　青岛　266237
3 中国科学院青岛生物能源与过程研究所　青岛　266101
4 中国科学院南海海洋研究所　广州　510301

摘要　减排增汇是我国实现碳中和目标的必然途径。海洋作为地球上最大的碳库，渔业生物的碳汇功能也受到关注。中国是世界上最大的海水养殖国家，以非投饵型的贝藻养殖为主，养殖种类丰富、营养层次多样、养殖技术成熟，“海洋负排放”的发展潜力巨大。然而，贝藻类养殖的负排放过程复杂，其负排放的科学原理、过程机制、计量方法及增汇途径等科技问题正在被逐步认知和解决。文章阐释了渔业碳汇的研究进展、存在问题和可能影响，提出了拓展养殖空间和提高养殖单产、基于养殖容量管理制度的海水养殖绿色发展、多营养层次综合养殖模式、蓝碳牧业工程、海洋人工上升流增汇工程等践行“海洋负排放”的技术途径和对策建议。

关键词　海水养殖，海洋负排放，大型藻类，滤食性贝类，微型生物碳泵

DOI　10.16418/j.issn.1000-3045.20210217101

全球气候变化是当今人类社会可持续发展所面临的最严峻挑战之一。二氧化碳（CO_2）等温室气体的过度排放加剧了全球气候变化，致使全球气温升高、海平面上升、海洋酸化和极端天气频发等，给人类的生产、生活及生存所带来的负面影响与日俱增。温室气体控制已成为重大国际问题。作为负责任的大国，2020年中国作出了2030年碳达峰和2060年碳中和的承诺。然而，由于中国经济正处于高速增长阶段，这使得我国目前已成为全球CO_2排放总量最多的国家，仅靠减少排放量难以实现控制CO_2排放的目标。因此，在减排的同时加强增汇是实现碳中和目标的必然途径[1]。

蓝碳（blue carbon），也称海洋碳汇，是利用海洋活动及海洋生物吸收大气中的CO_2，并将其固定在海洋中的过程、活动和机制。海岸带的红树林、滨海沼泽、海草床等海洋生态系统及浮游植物是海岸带蓝碳的主力军，近海（含海水养殖区）、开阔大洋及深海中可长久储存的碳具有更大的蓝碳储量。海洋作

资助项目：科学技术部重点研发计划课题（2020YFA0607603），国家自然科学基金委员会-山东省人民政府联合基金项目（U1906216），国家自然科学基金（41776155），中国科学院战略性先导科技专项（A类）（XDA23050402）
修改稿收到日期：2021年2月26日；预出版日期：2021年3月5日

为地球上最大的碳库，碳储量约为39万亿吨，每年约吸收排放到大气中CO_2的30%。海洋的巨大负排放潜力，成为国际研究热点，同时促进了蓝碳研究的发展。保护国际（CI）、世界自然保护联盟（IUCN）、政府间海洋学委员会（IOC）和联合国教科文组织（UNESCO）等国际组织通过与各级政府的合作，在全球范围推广蓝碳的政策与科学研究。随着海洋蓝碳逐渐进入人们的视野，渔业生物的碳汇功能也受到关注。“碳汇渔业”正是在这种背景下提出的发展渔业经济的新理念。中国是世界上最大的海水养殖国家，养殖贝类、藻类等带来的渔业碳汇的研究已经在中国开展了十几年[2,3]。虽然从蓝碳的广义概念上，我国将养殖贝藻类列入蓝碳范畴[4]，海洋微生物碳泵（MCP）理论[5]及养殖区增汇的潜在路径[6]于2019年纳入了联合国气候变化专门委员会（IPCC）《气候变化中的海洋和冰冻圈特别报告》的负排放方案。但是，关于贝藻类养殖的负排放的科学原理、过程机制、计量方法及增汇途径等研究目前依然欠缺。

2020年12月召开的中央经济工作会议将“做好碳达峰、碳中和”工作列入2021年要抓好的8大重点任务之一。做好碳达峰、碳中和工作，对我国实现经济行稳致远，全面建设社会主义现代化国家具有深远意义。基于此，本文试从海水养殖在“海洋负排放”中的战略地位作用为视角，阐释渔业碳汇的研究进展、存在问题和可能影响，提出践行“海洋负排放”的技术途径和对策建议。希望能为我国践行碳中和承诺、积极参与全球碳排放治理提供参考和借鉴。

1 海水养殖在“海洋负排放”中的战略地位和作用

1.1 以非投饵型的贝藻为主是中国海水养殖的特点

中国是海水养殖大国，养殖生物以不投饵、低营养级的大型藻类和滤食性贝类为主，养殖结构相对稳定。与世界上其他国家相比，中国的海水养殖具有养殖产量高、规模大、养殖种类繁多、多样性丰富、营养级低、生态效率高的特点[7]。例如，2019年中国海水养殖的产量为2 065万吨，以非投饵型的大型藻类（254万吨淡干）和滤食性贝类（1 439万吨）为主[8]，非投饵率占海水养殖总产量的80%左右；并且，养殖生物的营养级范围为2.24—2.27，远低于世界发达国家（如欧洲国家）和其他发展中国家（如东南亚国家）[9]。联合国粮食及农业组织（FAO）2020年公布的数据汇编显示，2018年我国的海水贝类、藻类养殖总量和总产值均居世界首位。中国水产养殖结构特点符合现代发展的需求，不仅提供了优质蛋白，还解决了居民吃鱼难的问题，更为农民增收和渔业结构调整作出了重要贡献。同时，这种养殖结构也对减排CO_2、缓解海域富营养化发挥积极作用。

1.2 “海洋可移除的碳汇”：海水养殖贝藻生物量碳

海洋初级生产是海洋光合生物利用光能将CO_2同化为有机物的过程。作为初级生产者，大型藻类是海洋碳循环过程的起始环节和关键部分。大型藻类通过光合作用将海水中的无机碳转化为有机碳，同时吸收营养盐以构建自身的结构物质。海藻对溶解CO_2的吸收可以降低CO_2分压，打破水体的碳化学平衡，加速大气CO_2向海水溶入；再者，海藻生长过程对营养盐的吸收可以提高养殖海区表层海水pH值，进一步降低CO_2分压，促进并加速了大气CO_2通过碳酸盐平衡体系向海水中扩散，二者均起到了积极的碳汇作用。

滤食性贝类可通过钙化和摄食生长利用海洋中的碳，增加生物体中的碳含量；但是，考虑到碳的储存周期，这部分生物体中的碳无法长久封存。据统计，我国每年通过收获贝类可以从海水中移除近200万吨的碳，相当于植树造林约50万公顷[3]。

1.3 “可产业化的蓝碳”：我国未来发展海洋渔业碳汇潜力巨大

我国作为海洋大国和海水养殖第一大国，发展海洋渔业碳汇潜力巨大。① 海洋自然条件优越，空间资

源优渥。我国有近 300 万平方公里的主张管辖海域，15 米等深线以内的浅海滩涂面积约 1 240 万公顷，20—40 米水深的海域面积约 3 700 万公顷，而目前我国海水养殖面积仅为 204 万公顷，未来海水养殖的空间潜力巨大。② 海洋生物资源丰富。我国海水养殖种类丰富、营养层次多样，而且随着良种培育技术的提高，每年不断有新品种问世，这使得筛选高效固碳养殖品种、建立多种形式的增汇模式（如轮养、间养、空间立体养殖、多营养层次综合养殖）成为可能。③ 海水养殖技术成熟。目前，我国海水养殖产业已形成了新品种培育—苗种繁育—增养殖技术—收获加工整个产业链。海水养殖既可提供大量优质蓝色海洋食物，又能着力于“海洋负排放”，是双赢的人类生产活动，未来有望成为发展潜力巨大的“可产业化的蓝碳”。

2 海水养殖的碳汇效应研究进展与问题

2.1 养殖生态系统的碳汇效应

海洋贝类通过滤食、呼吸、钙化、生物性沉积等过程对浮游植物、颗粒有机碎屑、海水碳酸盐体系、沉积埋藏等碳的生物地化循环过程影响很大[10]。养殖贝类主要可通过两种途径利用海洋中的碳：一种方式是通过钙化直接将海水中的碳酸氢根（HCO_3^-）转化形成碳酸钙（$CaCO_3$）贝壳，另一种方式是通过滤食水体中的颗粒有机碳（包括浮游植物、微型浮游动物、有机碎屑、微生物等）合成自身物质[11]，增加生物体中的碳含量。而未被利用的有机碳则通过粪粒和假粪粒的形式沉降到海底，加速了有机碳向海底输送[12]。因此，我们不仅可以通过收获养殖贝类从海水中移除碳，还可以通过养殖贝类的生物泵和碳酸盐泵从海水中移除碳。但是，超负荷的贝类养殖会对浮游植物产生下行控制作用，影响初级生产力；而且，贝类钙化是个双向的复杂过程。因此，关于养殖贝类的碳汇效应需要从整个生态系统来考量，有待进一步研究以提供充分的科学证据。

2.2 渔业碳汇机理研究亟待加强，以科学考量渔业碳汇效应

碳足迹（carbon footprint）研究亟待加强，以科学考量渔业碳汇效应。例如，大型藻类光合作用具有很强的吸收固碳能力，但如果不及时收获，成熟的藻类将会很快腐烂分解，固定的碳又返回海水中，在微生物的进一步作用下甚至重新返回大气。因此，大型藻类在收获后可以作为食品、饵料、饲料及工业原料，延长碳的释放过程；并且可以作为低碳强度的产品替代高碳强度的产品或者生物质能源。

藻类的养殖有可能成为长期的碳汇[4]。在藻类生长过程中产生的碎屑有机碳[13]，可以通过传统食物链成为其他生物的食物来源，或者通过直接的沉降作用最终沉积埋藏于海底[14]或被输运到深海中[15]。另外，大型藻类在生长过程中释放的溶解有机碳（DOC）和颗粒有机碳（POC），可以在微食物环作用下，进入食物网或形成惰性有机碳（RDOC）而长期驻留在海水中[10,16]。

当前，基于营养盐调控的人工上升流已被纳入IPCC报告。可见，以养殖贝藻为主的渔业碳汇的形成机制，已经涉及传统的溶解度泵、碳酸盐泵、生物泵及近年提出的微生物碳泵[17]，是一个极为复杂的过程。养殖贝藻带来的渔业碳汇从最初的“可移除碳汇”到 POC 的沉积埋藏和水体 RDOC 形成等研究的不断深入（图 1），使人们认识到只有弄清渔业碳汇机理、量化过程，才能最终给出科学的计量方法，从而推动渔业碳汇的碳补偿、碳交易、碳市场。

2.3 全球气候变化对海水养殖的影响

海水养殖具有“海洋负排放”的巨大潜力，同时，全球气候变化也反作用于海水养殖产业。全球气候变化对海水养殖影响的研究依然存在诸多的未知量和不确定性，表现出 2 个显著的特征：① 全球变暖和极端天气的频率和程度增加。全球变暖导致的

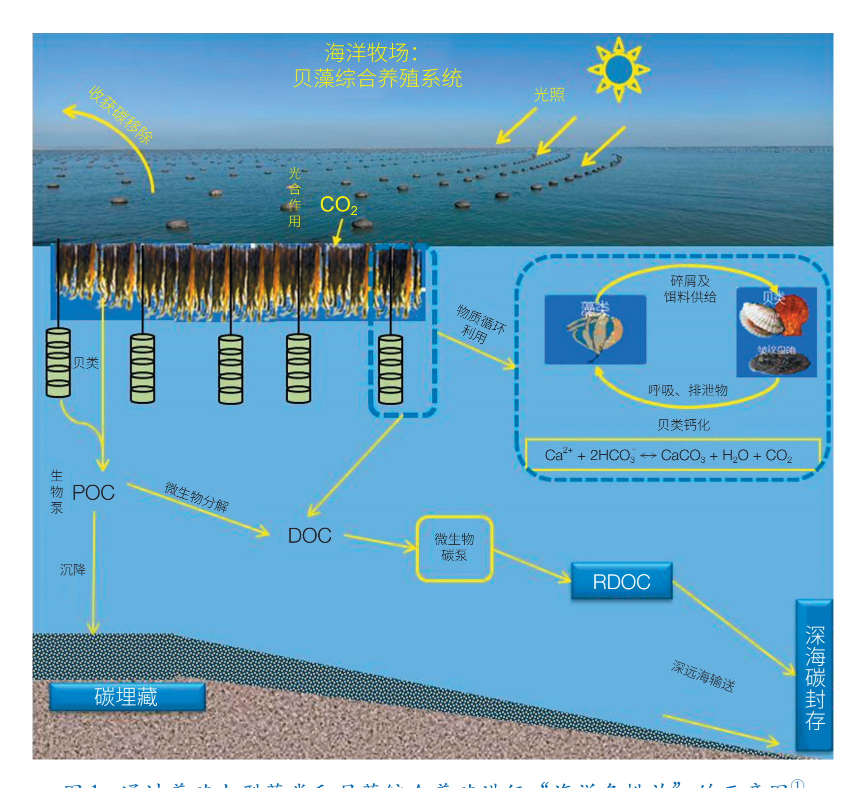


图 1　通过养殖大型藻类和贝藻综合养殖进行“海洋负排放”的示意图①

Figure 1　Schematic diagram of ocean negative carbon emission based on seaweed farming and integrated culture of seaweed and bivalves

升温会改变养殖贝藻生物的代谢过程（如生长、呼吸等），在改变其体内物质净累积的同时也改变其品质，最终影响其对碳的固定与存储，以及碳汇功能，而极端天气（如台风）对海水养殖的破坏效应更是难以估计。② 海洋酸化。海洋酸化可以影响初级生产者体内的生物大分子（如脂肪酸）、次级代谢产物（如苯酚类）、生源要素（如碘）等生化组分的含量和比例[18,19]，也可以改变初级生产者的群落结构和生物组成[20]，从而影响海洋食物网中物质和能量从初级到次级生产者及更高营养级的传递，引发食物链效应[21]。这种上行效应会影响海产品的品质，甚至危及人类健康。净现值估价法分析结果显示，海洋酸化对中国贝类产业经济的潜在影响巨大，未来 100 年内中国贝类产业经济将可能面临 142 亿—11 500 亿美元的现值损失，损失程度与海洋酸化程度相关[22]。

3 践行“海洋负排放”的技术途径

养殖环境的碳汇途径主要包括通过生物泵过程形成的 POC 在养殖区沉积环境中的埋藏、通过微生物碳泵过程形成的 RDOC，以及输入深海的碳封存。在加强养殖固碳机理、计量方法和碳足迹研究的基础上，增强生物泵和微生物碳泵的活动，如人工上升流、贝藻综合养殖、海洋牧场等，将提高近海及河口养殖区固碳增汇的能力，促进“海洋负排放”。

（1）拓展养殖空间，提高养殖单产。养殖贝藻的可移除碳量与单位面积养殖贝藻的产量和单位生物体内的碳含量呈正相关，因此提高单位面积的产量和筛选个体碳含量更高的贝藻是提高碳汇量的途径。通过筛选高固碳率的养殖品种、改进养殖技术和养殖模式等方式，合理、高效利用养殖海域，可提高单位面积的产量，进而提高单位面积的可移除碳量。同时，突破贝藻常规生长环境（如适温范围等），选育适温范围更广的品系、拓宽特定物种的生长空间、增加养殖面积，是实现养殖增汇的另一有效途径。

（2）完善养殖容量管理制度，促进海水养殖绿色发展。基于养殖生态容量进行标准化养殖，以保障贝藻养殖的稳产和高产。过去海水养殖规模盲目扩增，超负荷养殖，严重破坏了养殖水环境，使得病虫害加剧、赤潮等灾害事件频发。因此，这不仅不能增加养殖产量，还严重危及了养殖业的可持续发展。基于养殖容量管理制度，形成结构优化、密度适宜、功能高

① 焦念志，刘纪化，石拓，等．实施海洋负排放 践行碳中和战略．中国科学：地球科学，2021 待刊出．

效的养殖生态系统，才能实现海水养殖的绿色发展。

（3）推广多营养层次综合养殖模式。多营养层次综合养殖模式（IMTA）不仅实现了碳的有效循环利用，加速了生物泵的运转，使各个营养层级生物的碳汇能力得到充分发挥，进一步提升了养殖系统对 CO_2 的吸收利用能力；此外，通过 IMTA 可以减轻甚至消除养殖过程对环境的压力，有利于养殖系统稳定地可持续地产出。在比例合理的贝藻混养体系中，藻类不仅能够吸收贝类代谢所释放的氮、磷等营养物质，还可以吸收贝类呼吸释放出的 CO_2；贝类生长过程中则可以通过滤食浮游植物及藻类碎屑和凋落物等，一方面可以净化水质、增加水体光照，为藻类生长提供更多的能量；另一方面可以防止浮游植物与藻类竞争营养盐，有利于养殖藻类的生长和碳累积。在贝藻相互作用的过程中，整个综合养殖系统中的碳汇功能相比单品种养殖实现了很大程度的提高。

（4）实施人工蓝碳“蓝碳牧业”（海洋牧场）工程。通过人工鱼礁等工程技术，复建原有种群和群落，推动传统渔场、海洋牧场资源恢复。以“蛎礁藻林”工程为例：以人工块体为附着基恢复浅海活牡蛎礁群，建立以活牡蛎礁为基底的野生海藻场，形成野生贝藻生态系统，拓展蓝碳富集区，同时为海洋生物提供栖息地，建立稳定长效的生态系统碳汇区。

（5）实施海洋人工上升流增汇工程。在大型海藻高密度养殖区，养殖密度过大会造成上层水体内营养盐极度缺乏，无法满足海藻快速生长的需求，甚至会引发海藻在春季的大量死亡；与此同时，在养殖区海藻无法生长的底层水体中氮、磷较为丰富，却得不到有效利用。通过施用人工上升流技术将深层水体中过剩的营养盐输送到上层水体，可以充分满足海藻等光合固碳、生长对营养盐的需求。适宜的营养盐浓度不仅可提高海藻产量，还可提高生物泵与微生物碳泵的综合效应，从而增加近海碳汇。人工上升流作为一种地球工程系统，可以持续地将真光层以下的深层高营养盐海水带至真光层。这个过程不仅会提升总的上层营养盐浓度，也会调整因生物生长利用、释放所引起的氮、磷、硅、铁等比例的失衡，有利于藻类及浮游植物光合作用，增大渔获量和养殖碳汇，还可以增加生物泵效率的方式增加向深海输出的有机碳量。中国的人工上升流系统研制处于国际先进水平，已设计并制备了一种利用自给能量、通过注入压缩空气来提升海洋深层水到真光层的人工上升流系统，并取得了较好的海试效果。

参考文献

1 焦念志. 研发海洋“负排放”技术，支撑国家“碳中和”需求. 中国科学院院刊, 2021, 36(2): 179-187.

2 张继红, 方建光, 唐启升. 中国浅海贝藻养殖对海洋碳循环的贡献. 地球科学进展, 2005, 20(3): 359-365.

3 唐启升, 刘慧. 海洋渔业碳汇及其扩增战略. 中国工程科学, 2016, 18(3): 68-73.

4 唐剑武, 叶属峰, 陈雪初, 等. 海岸带蓝碳的科学概念、研究方法以及在生态恢复中的应用. 中国科学：地球科学, 2018, 48(6): 661-665.

5 Jiao N, Herndl G J, Hansell D A, et al. Microbial production of recalcitrant dissolved organic matter: Long-term carbon storage in the global ocean. Nature Reviews Microbiology, 2010, 8(8): 593-599.

6 Jiao N, Wang H, Xu G, et al. Blue carbon on the rise: Challenges and opportunities. National Science Review, 2018, 5(4): 464-468.

7 FAO. Fishery and Aquaculture Statistics: Global capture production 1950-2018. (2020-08-01)[2021-02-26]. http://www.fao.org/fishery/statistics/sottware/fishstatj/en.

8 农业农村部渔业渔政管理局, 全国水产技术推广总站, 中国水产学会. 2020中国渔业统计年鉴. 北京: 中国农业出版社, 2020.

9 唐启升, 韩冬, 毛玉泽, 等.中国水产养殖种类组成、不投

饵率和营养级. 中国水产科学, 2016, 23(4): 729-758.

10 张永雨, 张继红, 梁彦韬, 等. 中国近海养殖环境碳汇形成过程与机制. 中国科学：地球科学, 2017, 47(12):1414-1424.

11 Tang Q S, Zhang J H, Fang J G. Shellfish and seaweed mariculture increase atmospheric CO_2 absorption by coastal ecosystems. Marine Ecology Progress Series, 2011, 424: 97-104.

12 Crawford C M, Macleod C K A, Michell I M. Effects of shellfish farming on the benthic environment. Aquaculture, 2003, 224(1/2/3/4): 117-140.

13 Zhang J H, Fang J G, Wang W, et al. Growth and loss of mariculture kelp *Sacchariana japonica* in Sungo Bay, China. Journal of Applied Phycology, 2012, 24(5): 1209-1216.

14 Sui J J, Zhang J H, Ren S J, et al. Organic carbon in the surface sediments from the intensive mariculture zone of sanggou bay: Distribution, seasonal variations and sources. Journal of Ocean University of China, 2019, 18(4): 985-996.

15 Krause-Jesnsen D, Duarte C M. Sustainable role of macrogalgae in marine carbon sequestration. Nature Geoscience, 2016, 9: 737-742.

16 Chen J, Li H M, Zhang Z H, et al. DOC dynamics and bacterial community succession during long-term degradation of *Ulva prolifera* and their implications for the legacy effect of green tides on refractory DOC pool in seawater. Water Research, 2020, 185: 116268.

17 焦念志. 海洋固碳与储碳——并论微型生物在其中的重要作用. 中国科学：地球科学, 2012, 42(10): 1473-1486.

18 BermÚ R, Feng Y, Roleda M Y, et al. Long-term conditioning to elevated pCO_2 and warming influences the fatty and amino acid composition of the diatom *Cylindrotheca fusiformis*. PLoS ONE, 2015, 10: e0123945

19 Jin P,Wang T F, Liu N N, et al. Ocean acidification increases the accumulation of toxic phenolic compounds across trophic levels. Nature Communications, 2015, 6: 8714.

20 Bach L T, Alvarez-Fernadez S, Hornick T, et al. Simulated ocean acidification reveals winners and losers in coastal phytoplankton. PLoS ONE, 2017, 12(11): e0188198.

21 Xu D, Bewnn G, Xu L, et al. Ocean acidification increases iodine accumulation in kelp-based coastal food webs. Global Change Biology, 2019, 25(2): 629-639.

22 于千钧, 陶永朝, 慕永通. 海洋酸化对中国贝类产业经济影响的初步研究. 中国海洋大学学报（社会科学版）, 2019, 166(2): 60-64.

Strategic Approach for Mariculture to Practice "Ocean Negative Carbon Emission"

ZHANG Jihong[1] LIU Jihua[2] ZHANG Yongyu[3] LI Gang[4]

（1 Yellow Sea Fisheries Research Institute, Chinese Academy of Fishery Sciences, Qingdao 266071, China;

2 Institute of Marine Science and Technology, Shandong University, Qingdao 266237, China;

3 Qingdao Institute of Bioenergy and Bioprocess Technology, Chinese Academy of Sciences, Qingdao 266101, China;

4 South China Sea Institute of Oceanology, Chinese Academy of Sciences, Guangzhou 510301, China）

Abstract Reducing CO_2 emissions and increasing carbon sinks are basic approaches to achieve carbon neutralization in China. China is the largest mariculture country in the world. China's mariculture industry is dominated by non-fed culture type and characterized by rich species, diverse nutrition levels, and advanced farming technology. Therefore, mariculture has huge potential for the development of ocean negative carbon emissions (ONCE). However, the ONCE process of bivalves and seaweed farming is complicated, and the scientific principles, process, mechanisms, monitoring and evaluating methods, and approaches of increasing carbon sink are gradually being recognized and yet to be resolved. This study discusses the research progress of fishery carbon sink, existing problems and possible impact of global climate change on ONCE of mariculture. It then proposes technological approachs and policy suggestions to implement ONCE , which include expanding mariculture space and increaseing unit yield, green development of mariculture based on carrying capacity regulatory regime, integrated multi-trophic aquaculture, blue carbon engineering of ocean ranching, and marine artificial upwelling.

Keywords mariculture, negative emission, seaweed, bivalve, microbial carbon pump



张继红 中国水产科学研究院黄海水产研究所研究员。中国水产学会理事，农业农村部海洋牧场建设专家咨询委员会委员。全国农业杰出人才及创新团队负责人。主要从事海水养殖生态、容量评估、多营养层次综合养殖理论与技术、渔业碳汇等方面的研究。主持国家重点研发计划课题、国家自然科学基金等科研项目，发表学术论文100余篇，授权专利20余项。E-mail: zhangjh@ysfri.ac.cn

ZHANG Jihong Professor of Yellow Sea Fisheries Research Institute, Chinese Academy of Fishery Sciences. She is council member of Chinese Fisheries Society, Committee member of the Expert Advisory Committee on Marine Ranch Construction, Ministry of Agriculture and Rural Affairs. She is National Agricultural Outstanding Talents and Innovation Team Leader. Her research interests include mariculture ecology, carrying capacity assessment, integrated multi-trophic aquaculture theory and technique, and fisheries carbon sink. She undertakes the research projects sponsored by National Key Research and Development Program of China, National Natural Science Foundation of China, and so on. She has published more than 100 papers, and has achieved more than 20 authorized patents. E-mail: zhangjh@ysfri.ac.cn

■责任编辑：张帆